



炭素繊維シート工法の電食について

炭素繊維シート工法にて補強したコンクリート構造物の鉄筋は、炭素繊維シートによる電食を起こしません。安心してお使い下さいますようお願いいたします。

記

1. 概要

今般、添付資料 1 に示すような炭素繊維シート工法が鉄筋を電食させるかのごとく、誤解を与えるような無記名の資料が各所に配布されていることが判明しました。

炭素繊維シート工法は、下図の積層断面図に示すように、樹脂材料で被覆され炭素繊維強化プラスチック（CFRP）となっており、施工された後は絶縁部材となります。従って、炭素繊維自体が直接鉄筋と触れることもなく、腐食電流（ガルバニック電流）が流れて電食を起こすことはありません。

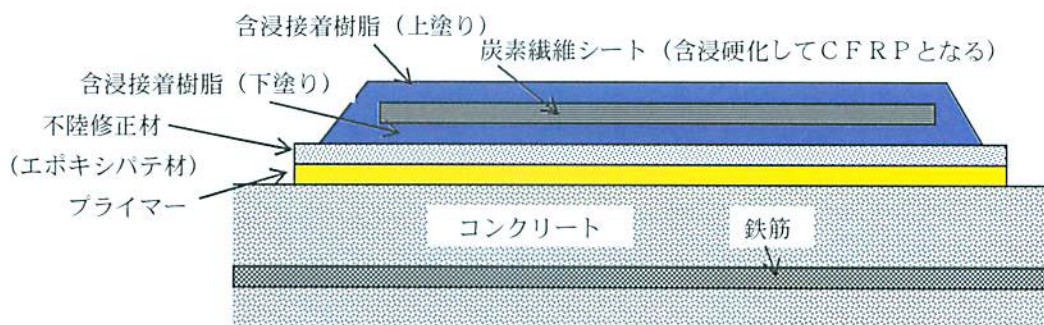


図 1. 炭素繊維シート工法の施工断面図

2. 過去の試験結果

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を用いた電食に関する試験では、添付資料 2～4 の試験結果があり、問題ないことが確認されています。

添付資料 2：「コンクリート中の炭素繊維強化プラスチックと鉄筋のガルバニック腐食特性、日本建築学会大会（1996 年 9 月）」において、CFRP ロッドと鉄筋の両方を配置した RC 部材を作製し、様々な環境での鉄筋自然電位と腐食電流を測定。CFRP の存在は鉄筋腐食に影響しないことを確認。

添付資料 3：「炭素繊維プレートによる鋼構造物の接着補強工法に関する基礎研究（その 2）ガルバニック腐食試験、日本建築学会大会（2006 年 9 月）」において、炭素繊維プレートを様々な条件で鋼材に直接接着させて、海水による乾湿繰り返し試験を 100 日間実施。塗料等で炭素繊維プレートを全面保護すれば、電食（ガルバニック腐食）は防げることを確認。

添付資料 4：「炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案）（財）土木研究センター（平成 14 年 7 月）」において、海洋環境での 3 年間の暴露試験で、炭素繊維強化プラスチックを巻き立てた鋼管に腐食の無いことを確認（p211～212）。

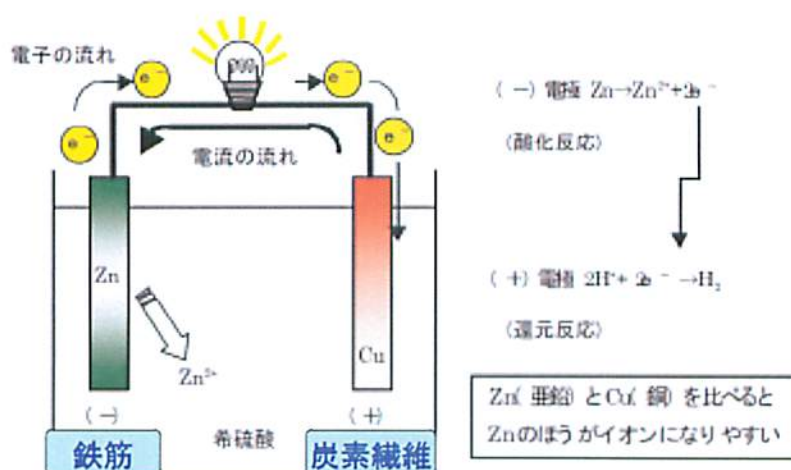
3. その他

炭素繊維シート工法が開発されてから 20 年近い年月が過ぎ、1 万件以上の施工事例がありますが、炭素繊維シートが原因の電食によって鉄筋が腐食した事例は報告されていません。

以上

水性環境における河川橋脚の耐震補強時の電気腐食の危険性

ボルタ電池



河川橋脚の耐震補強時に橋脚が水中に没する部分については、橋脚の中の鉄筋に電気腐食が発生する危険性があります。

ボルタ電池の亜鉛と同じように、水性環境で鉄筋と炭素繊維を同居させると、電位差が発生し、鉄筋が陽極電極となり酸化され（腐食）、イオンとなってコンクリート中に溶け出します。一方、炭素繊維側は陰極となり、還元されて水素を発生します。

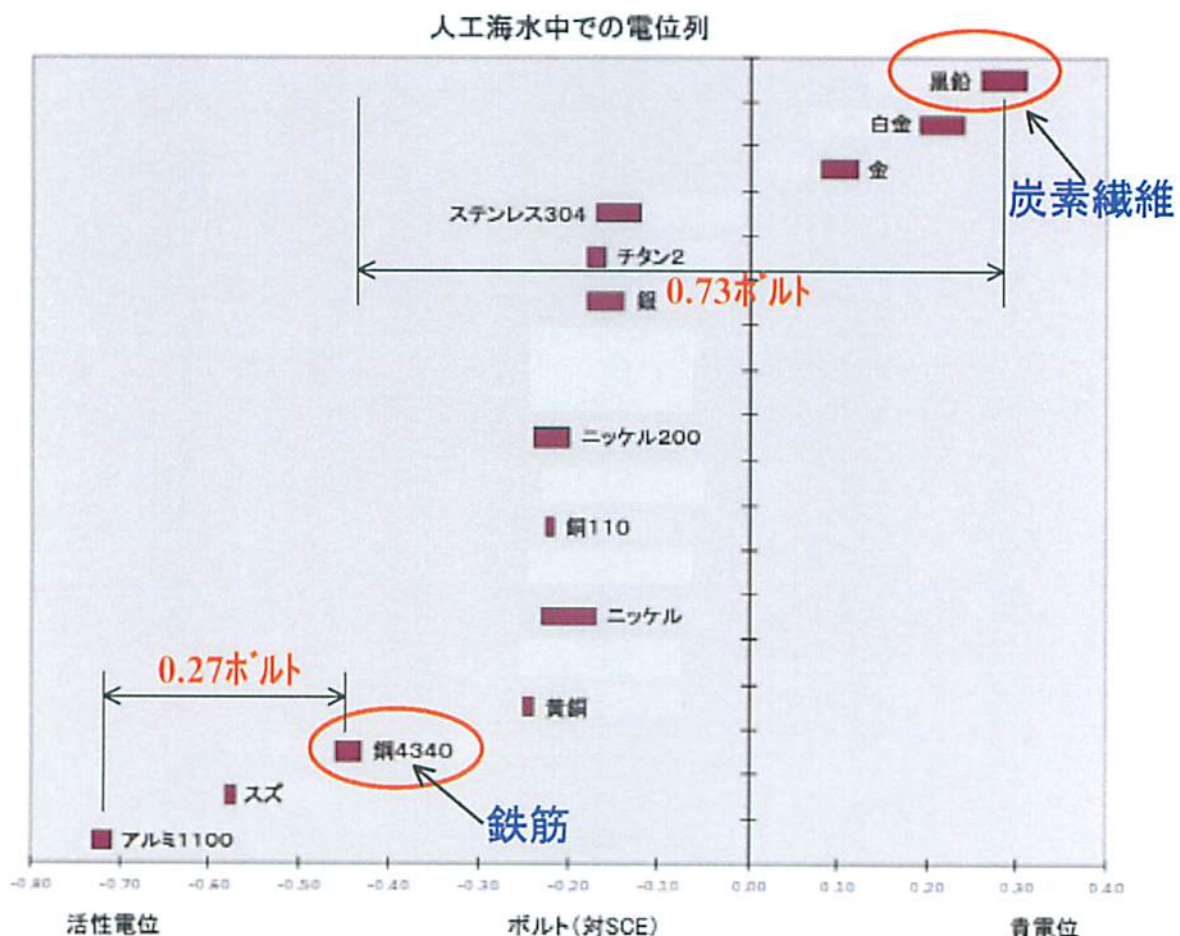
つまり、鉄筋の腐食はボルタ電池と同じように、鉄筋側がアノード部となり、炭素繊維側がカソード部となり、電池が形成され、電流の流れにより腐食が進行していきます。

この状態を電気腐食、この電池のことを腐食電池、電流を腐食電流と呼んでいます。



一般にこの腐食速度は次の要因に依るところが大きいと言われています。

- ①次図の電位列表で二種類の物質間の距離が離れているほど（電位差が大きいほど）、活性金属（鉄筋側）で激しい腐食が起こります。一般的に電気防食に用いるアルミニウムと鉄の電位差は、図より0.27ボルトですが、鉄筋と炭素繊維との電位差は、図より0.73ボルトと電位差が大きく、腐食速度が大きいことが予測されます。
- ②また腐食速度は、小さい陽極（鉄筋側）に対して大きい陰極（炭素繊維）が存在することもその要因となります。補強のための炭素繊維シートを全面に巻く場合、どこからでも電気腐食が発生することになり、また、小さい陽極（鉄筋側）に対して大きい陰極となることも推測されますので、鉄筋の各箇所において電流密度が陽極で高くなり、腐食が急速に進行することが予測されます。
- ③さらに、二種類の物質の接点からの距離が近いほど、活性金属（鉄筋側）で激しい腐食が起こります。土木構造物の場合、コンクリートの被り厚は数センチと小さく、冒頭の図のボルタ電池が形成されることが分かります。



コンクリート中の炭素繊維強化プラスチックと鉄筋のガルバニック腐食特性

正会員 ○ 相部真一^{※2}同 坂井広道^{※1}同 中村守康^{※2}

1. 緒言

近年炭素繊維強化プラスチック（以下 CFRP）を補強材料として使用したコンクリート構造物の実用化が進んできている。この CFRP を建築・土木材料として使用する際、炭素繊維と鉄筋のガルバニック腐食を考慮する必要がある。電解液中において、電位が負な炭素繊維と鉄が接触すると、鉄はガルバニック腐食を起こす。しかし CFRP 中の炭素繊維は樹脂で被覆されており、更に鉄筋はコンクリート中で不動態化しているため、ガルバニック腐食を起こす可能性はかなり低いと考えられる。そこで実際にコンクリート中での CFRP と鉄筋の自然電位、分極特性、腐食電流を測定し、そのガルバニック腐食特性の確認を行った。

2. 実験方法

2. 1 供試体

今回の実験に用いた CFRP の物性を表-1、供試体の一覧を表-2 に示す。自然電位・分極特性測定用供試体は塩分の影響を見るため、それぞれ塩を 5kg/m² 添加した供試体も作製した。また CFRP が実用に際し傷つくことを考慮し、CFRP を研磨した供試体も加えた。腐食電流測定用供試体は CFRP と鉄筋の相対位置の影響を見るため、直角に交わるものと、平行に配置したものを作製した。

2. 2 測定方法

供試体打設後材令 1 ヶ月経過後、各種測定を行った。

(1) 自然電位

コンクリート表面に照合電極を当てて高入力抵抗の電圧計を用い測定を行った。事前に上面のコンクリート表面を湿润状態として、乾燥による高抵抗及び液間電位差などの測定誤差が少なくなるようにした。尚、照合電極には鉛照合電極を用いたが、解析時に全て飽和硫酸銅電極に換算した。

(2) 分極特性

分極試験装置を用いて、定電流法で 0~50 μ A/cm² で、自然電位を中心に ± 300 mV 程度の範囲の分極特性を求めた。対極には濡れたガーゼを介し、供試体の側面に巻き付けたステンレス板を用いた。

(3) 腐食電流

常時鉄筋および CFRP を短絡状態にしておき、測定時に目的の回路間に零抵抗電流計を挿入し、それぞれに流入する電流を測定した。

表-1 CFRPの物性

呼称径 (mm)	8
タイプ	異形タイプ
マトリックス	エポキシ樹脂
繊維含有率 (%)	65
密度 (g/cm ³)	1.6

表-2 供試体一覧

測定項目	対象	環境	個数
自然電位・分極特性	鉄筋	通常	1
		塩添加	1
	CFRP	通常	1
		塩添加	1
	CFRP (研磨)	通常	1
		塩添加	1
腐食電流	直交	通常	2
	平行	通常	2

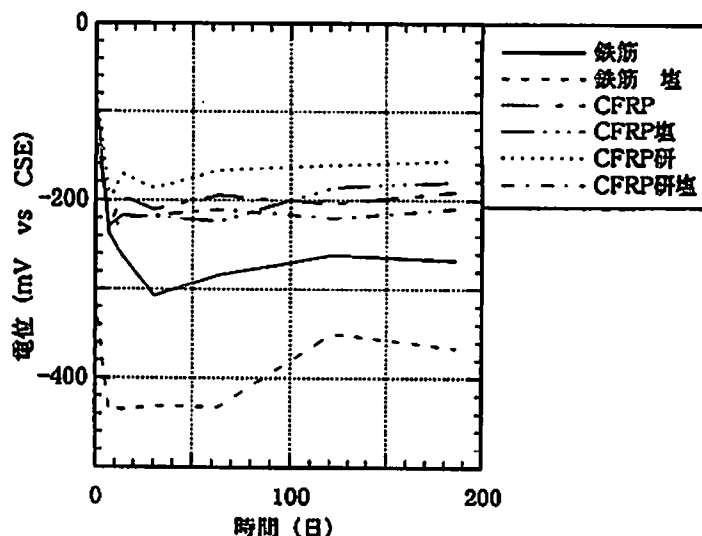


図-1 自然電位

3. 実験結果及び考察

3. 1 自然電位

図-1に自然電位の測定結果を示す。分極特性試験の影響を受け、絶対値の比較は難しいが、CFRPが塩分、表面研磨の影響を殆ど受けないのに対し、鉄筋は塩分により大きな影響を受けている。鉄筋は測定開始初期に於いて、塩分がない場合-100mV程度で不動電位化しているが、塩分が存在する場合、-300mV以上の卑な値を示し、腐食状態にあると考えられる。従って塩分が存在しない場合、鉄筋とCFRPの電位差は小さく、マクロセルを形成しても腐食は少ないと考えられる。塩分が存在する場合、鉄筋とCFRPは最大で250mV程度の電位差を生じ、鉄筋とCFRPの間に大きなマクロセルが形成されるため、CFRPによって腐食が加速される可能性が高いと予想される。

3. 2 分極特性

図-2にCFRP、図-3に鉄筋の分極特性の測定結果の一部を示す。得られた分極特性より、鉄筋の自己腐食による電流密度と、鉄筋とCFRPとのガルバニック腐食による電流密度を面積比を1:1として計算した結果を表-3に示す。自然電位から大きなマクロセルが形成されることが予想されたが、表-3に示すように自己腐食に比べ、ガルバニック腐食の影響は小さい。さらに、実際には鉄筋の総表面積に比べ、通かに炭素繊維の露出する面積は小さいため、CFRPによるガルバニック腐食の影響は非常に少ないと考えられる。

3. 3 腐食電流

図-4に腐食電流の測定結果の一部を示す。どの供試体も初期にアノード電流密度は大きい(最大145nA/cm程度)、時間経過と共に減少し、配置による違いはない。半年後、アノード電流密度は20~30nA/cm(0.24~0.36 μ m/Yrの腐食速度に相当)に低下し、鉄筋は不動電位化していると考えられる。また鉄筋同士でもマクロセルを形成していることから、炭素繊維の影響が殆ど出ていないと判断される。

4. まとめ

(1) 普通コンクリート中で鉄筋とCFRPを併用した場合、健全なコンクリートであれば、鉄筋は不動電位化しているため、CFRPの存在に関係なく、耐久性は高い。

(2) コンクリートが塩害環境下に置かれた場合、鉄筋が腐食状態となり、腐食部分と健全な部分との間でマクロセルを形成し、腐食が加速される。このときCFRPともマクロセルを形成するが、鉄筋の自己腐食に比べその影響は小さく、一般鋼材のみで形成されたコンクリート建造物の劣化と大差がないと考えられる。

【謝辞】

今回の実験に際し、計画・測定を始め数々の協力を頂いた、九州大学工学部教授 林安徳氏、日本防蝕工業(株) 石川光男氏に謝意を表します。

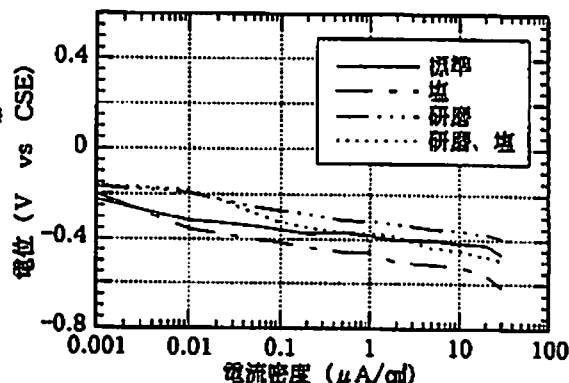


図-2 CFRP陰分極特性(6カ月後)

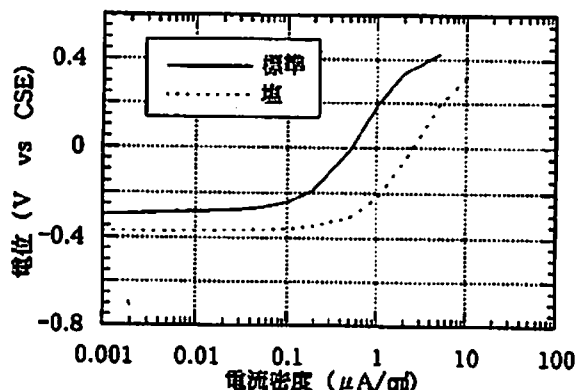


図-3 鉄筋陽分極特性(6カ月後)

表-3 分極特性より予想される腐食電流密度

環境	通常	塩分有り
ガルバニック腐食 (μ A/cm²)	<0.01	<0.3
自己腐食 (μ A/cm²)	<0.1	<2

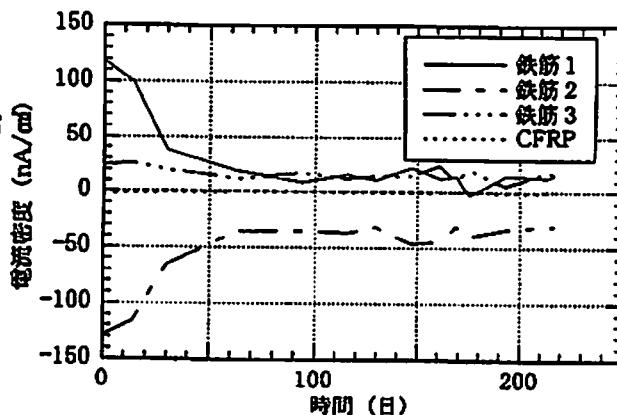


図-4 腐食電流(直交)

※1 三菱化学・工博

Mitsubishi Chemical, Dr.

※2 三菱化学・工修

Mitsubishi Chemical, Master

炭素繊維プレートによる鋼構造物の接着補強工法に関する基礎的研究 (その2) ガルバニック腐食試験

炭素繊維プレート ガルバニック腐食
ガルバニック電流 腐食減量

○正会員 小澤 吉幸² 同 玉井 宏章¹
同 高松 隆夫¹ 同 灰谷 徳治²
同 服部 明生² 同 櫻庭 誠¹
同 白木 剛¹

表1 試験体名称

試験体名称	接着状態
CNN	接着剤はみ出しなし
CAN	接着剤はみ出しあり
CPF	接着剤はみ出しあり、CFRP(防食塗装)
CPN	接着剤はみ出しなし、腐食部(防食塗装)

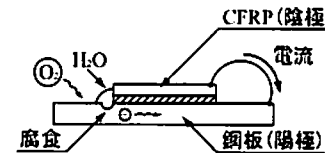


図1 ガルバニック腐食のメカニズム

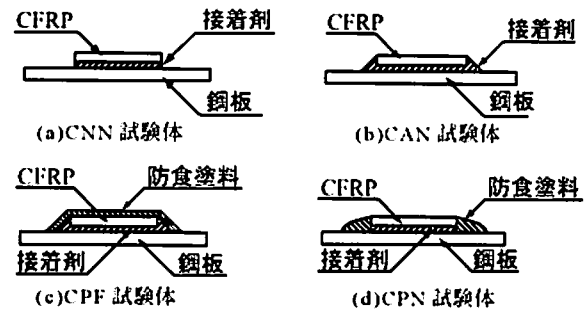


図2 試験体の種類

1. はじめに

鋼構造建築物に炭素繊維プレートを用いて補強をする際、接着剤を用いた工法が利用されている¹⁾。鋼板と炭素繊維プレート(導電性材料)が接触し、湿潤状態となると電池作用によっていわゆるガルバニック腐食が生じる²⁻⁴⁾。鋼材と炭素繊維プレート間の接着剤は非導電性であり、工法として両者が接触することは考えにくいとされているが、何らかの要因で鋼材と炭素繊維プレートが接触すれば、ガルバニック腐食が生じ、鋼材の腐食が促進される可能性がある。この腐食が進行すると、炭素繊維プレートと鋼板の境界部に局部腐食が発生し、鋼材の機械的性質を著しく劣化させるため、この腐食の鋼材に及ぼす影響やその対策を検討する必要がある。

本報では、炭素繊維プレートを接着した鋼板について塩水による乾湿繰り返し下におけるガルバニック腐食試験を行い、基本腐食特性と、効果的な防食塗料の利用法を検討する。

2. ガルバニック腐食試験

鋼の腐食は、水分・酸素の環境下で鉄がイオン化して酸化される電気化学反応である。腐食のメカニズムを図1に示す。導電性のある異種金属たとえば、炭素繊維プレートと鋼板とが接触すると、イオン化傾向が異なるため、炭素繊維プレートは陰極(カソード)、鋼板は陽極(アノード)となって電池が形成される。電流が流れるとアノードとなる鋼板の腐食速度は加速される。

生体電流の発見の糸口を見つけた化学者のガルバニにちなんで、この腐食のことをガルバニック腐食と呼んでいる。

本論文では、鋼と炭素繊維プレートとのガルバニック腐食の基本特性を示すために行なった試験結果を示す。

2.1 試験体

試験体の種類・形状を図2に、試験体名称を整理して表1に示す。

試験体は、鋼板(PL-250x150x6mm)の上面に、高強度型炭素繊維プレート(TL-520, 150x50x2mm)を接着したCNN試験体、CNN試験体に加えて炭素繊維プレート(CFRP)の周辺に接着剤を5mm程度はみ出させ、端部の保護対策を施したCAN試験体、CAN試験体に加えて、炭素繊維プレートの表面全体を防食塗料で保護したCPF試験体、及び、CNN試験体に加えて、炭素繊維プレート周辺の鋼板の腐食部15mm幅を防食塗料で保護したCPN試験体の4種類とした。各種類についてそれぞれ4体ずつ、計16体の試験体を製作した。次節で述べる、短絡試験用の半数については、導線を炭素繊維プレート中央と鋼板側部に取付けた。導線と炭素繊維、鋼板との接合には、塩水に強い銀粉を混入したアクリル系導電性接着剤(藤倉化成 D-550)を用いた。

炭素繊維プレートと鋼板の接着は、接着面を紙ヤスリ(#100)で目粗しした後、脱脂し、常温二液硬化型エポキシ樹

脂接着剤(コニシ ボンドE250R)で接着し、室温20℃以上で7日間養生した。この接着面では、炭素繊維プレートと鋼板とは絶縁状態にあることを全試験体について確認した。防食塗装は、下塗り、上塗りの2段階を施し、下塗りについては、エポキシ樹脂系塗料(関西ペイント エコス)を、上塗りについては、ポリウレタン樹脂系塗料(関西ペイント セララクトU)を用いた。また、試験体の裏面が腐食しないように同様に防食塗装した。

2.2 試験概要

○試験方法

各種の試験体について、炭素繊維プレートと鋼板とを無抵抗電流計を介して短絡させた状態及び絶縁させた状態(図3参照)で、3%濃度の食塩水に2時間湿潤させた後22時間空气中に放置することを1サイクルとする乾湿繰り返し試験を100日(100サイクル)行った。

また腐食試験終了後、短絡状態、絶縁状態での腐食状況の差異及び絶縁状態試験体の導通の有無を電位差計で確認する(導通状態であれば電位差は0Vとなる)とともに、炭素繊維プレートを除去して、接着面の状況を検査した。

○計測方法

塩水乾湿繰り返し試験では、短絡状態の試験体について、ゼ

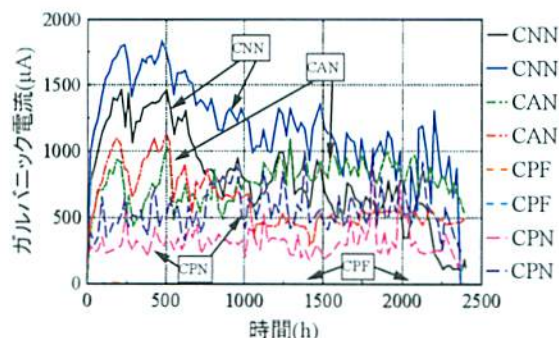


図3 ガルバニック電流-時間関係(100日間)

表2 絶縁状態試験体の電気抵抗と電位差

試験体名称	電気抵抗(MΩ) (乾燥状態)	電位差(V) (湿潤状態)
CNN	2000以上	0.28
CAN	2000以上	0.39
CPF	2000以上	0.29
CPN	2000以上	0.27

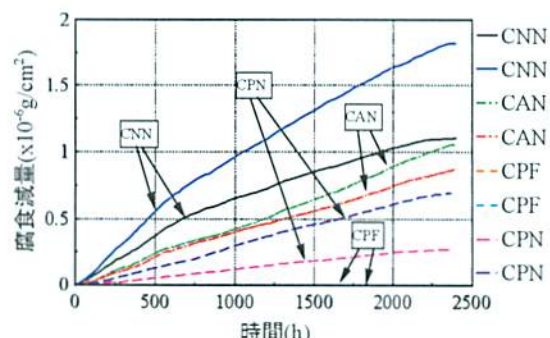
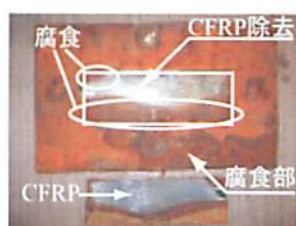


図4 腐食減量-時間関係(100日間)

表3 100日後の絶縁状態試験体の状況

試験体名称	導通の有無	CFRP接着面の状況
CNN	絶縁	腐食あり
CAN	絶縁	はみ出し部の腐食あり
CPF	絶縁	はみ出し部の腐食あり
CPN	絶縁	腐食部の腐食あり



(a) 短絡, CNN 試験体



(b) 絶縁, CNN 試験体



(c) 短絡, CPF 試験体



(d) 絶縁, CPF 試験体

写真1 2400時間(100日目)経過後の各試験体の接着面と腐蝕状況

口抵抗電流計(東京測器 E-792-10A)により, ガルバニック電流を, また, 気温, 塩水温を熱電対で計測した。

計測したガルバニック電流から, 腐食電流密度を次式により算定した⁶⁾。

$$I_{\text{corr}} = \frac{I}{S} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに,

I_{corr} : 腐食電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
 I : ガルバニック電流 (μA)
 S : 鋼板の表面積 (cm^2)

鋼板の表面積は, 試験体の表面の炭素繊維プレートの接着位置と裏面を除いた面積とする。また, 腐食電流密度から, 腐食減量を次式により算定した。

$$G = \frac{M}{2 \cdot Fa} \int I_{\text{corr}} dt \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに,

G : 腐食減量 ($\times 10^{-6} \text{g}/\text{cm}^2$)
 M : 鉄1モルの質量 ($55.8 \text{g}/\text{mol}$)
 Fa : ファラデー数 ($96500 \text{C}/\text{g-eq}$)

3. 試験結果とその考察

試験結果を図3, 4, 表2, 3及び写真1に示す。図3には全100日間のガルバニック電流と時間の関係の包絡線を, 図4には, (1), (2)式から求めた腐食減量と時間の関係を, 表2には, 絶縁試験体における腐食試験後の, 炭素繊維プレートと鋼板の電気抵抗と電位差を, 表3には, 絶縁試験体における腐食試験

後の炭素繊維プレートと鋼板の導通の有無と, CFRP裏面の腐食状況を, 写真1には, 各試験体の腐食状況を示す。

得られた知見は以下のように要約できる。

- ガルバニック電流・腐食減量特性について
炭素繊維プレートと鋼板が短絡した場合には, CPF試験体を除き, 初期段階からガルバニック電流が発生する。
- ガルバニック腐食特性について
CPF試験体にガルバニック腐食の影響が認められなかったことから, 塗装等で炭素繊維プレートを全面被覆すれば, ガルバニック腐食は防止できる。
- 接着面下の腐食状況について
絶縁試験体には試験終了後にも0.3V程度の電位差が計測された。したがって炭素繊維プレートと鋼板とは, 100日塩水乾湿繰り返しを経た後も絶縁された状態を保持する。

謝辞

本研究を実施するにあたり, 2005年度玉井研究室卒業生の協力を得た。また, 試験体製作にあたり, 東レ興業川研二, 中林伊織氏には材料を支給していただいた。また, 興ナカコーテック技術研究所 望月紀保氏に試験方法ご指導いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 服部明生, 灰谷徳治, 櫻庭誠: 炭素繊維プレートによる化学プラント架構小ばり補剛の施工例, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp.545-552, 2005.11
- 2) 友野理平: 腐食・防食用語辞典, オーム社, 1975.7
- 3) 藤井哲雄: 初步から学ぶ防錆の科学, 工業調査会, 2001.3
- 4) 松島薫: 腐食防食の実務知識, オーム社, 2002.2
- 5) 社団法人, 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案), 1987
- 6) 太星謙, 柳東佑, 王政宏, 兼松学, 野口貴文, 宇城工: Cr鋼防食鉄筋によるRC造建築物の耐久性向上技術に関する基礎的研究(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.553, 2003.9

*1 広島工業大学 工学部
 *2 東レ建設(株) 技術設計部

炭素繊維シートによる鋼製橋脚の
耐震補強工法研究会報告書

炭素繊維シートによる
鋼製橋脚の補強工法ガイドライン(案)

平成14年7月

財団法人 土木研究センター

(3) 試験結果

塩水噴霧暴露試験後に行った引張試験の結果は、表一資 4.3.2 に示す通りである。

表一資 4.3.2 塩水噴霧暴露後の引張試験結果

暴露期間	引張強度 (N/mm ²)	σ_{n-1} (N/mm ²)	強度残存率 (%)
0年	2,078	49	
1年	2,097	39	100.9

したがって、CFRPロッドφ3mm に対する塩水噴霧暴露試験後の引張強度の低下が認められなかったことから、CFRPシートは、これと同様、十分な海水性を有していると考えられる。

4.3.5 引張強度等に関する海洋環境における耐久性⁽³⁾

(1) 試験目的

CFRPの海洋環境での耐候性を確認することを目的として、海洋環境での長期自然暴露試験を実施した。

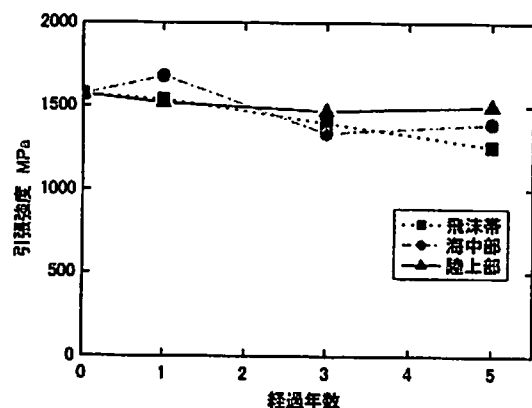
(2) 暴露試験条件

- 1) 暴露期間：5年間
- 2) 暴露条件：飛沫帯、海中部、陸上部の3種類
- 3) 試験項目：CFRP引張試験（JIS K7073「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」準拠）

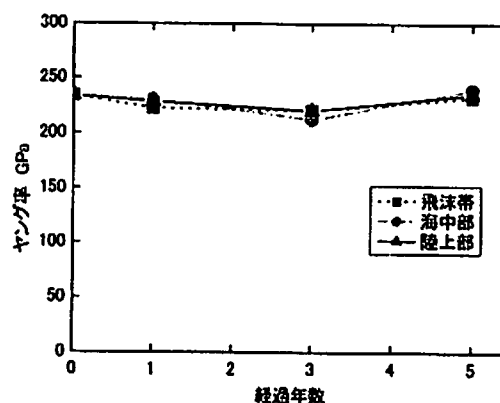
(3) 試験結果

引張強度及びヤング率の試験結果の推移は、図一資 4.3.7 および 図一資料 4.3.8 に示す通りである。

海洋環境下でのCFRPは、5年の自然暴露後において、引張強度が若干の低下傾向を示すものの、ヤング率がほとんど変化しておらず、十分な耐候性を有すると考えられる。



図一資 4.3.7 海洋暴露後の引張強度の推移



図一資 4.3.8 海洋暴露後のヤング率の推移

4.3.6 海洋環境における防食性能⁷⁾

(1) 試験目的

海中、スプラッシュゾーンにおいて、連続繊維シートの海洋環境での耐久性を確認するとともに、炭素繊維シートによる鋼管の防食効果を確認することを目的として、炭素繊維シートとガラス繊維シートを巻きたてた鋼管の暴露試験による評価を行った。

(2) 試験方法

炭素繊維シートとガラス繊維シートをエポキシ樹脂で接着して巻き立てた後ウレタン塗装を施した、外径約100mmの圧力配管用鋼管を、海中およびスプラッシュゾーンに各2本ずつ水平に放置して暴露し、耐久性および防食性能について評価した。

評価は、暴露開始後、1年後、3年後に供試体を引き上げ、鋼管の腐食状況、シートの外観、シートと鋼管の剥離の有無についての検査によることとした。

(3) 試験結果

試験結果は、図-4.3.9に示す通りである。炭素繊維シート巻き立て部およびガラス繊維シート巻き立て部は、3年間の暴露後もシートの剥離が発生せず、また、繊維シート巻き立て部の鋼管も腐食しておらず、良好な防食性能を示した。さらに、防食被覆をしていない鋼管端部は、腐食が生じたが、この部分の腐食が炭素繊維シート巻き立て部に進行することはなかった。

ただし、3年後の調査では、一部、流石などの打撃によりシートの表面が削れて鋼材が露出し、腐食が生じている箇所が認められた。

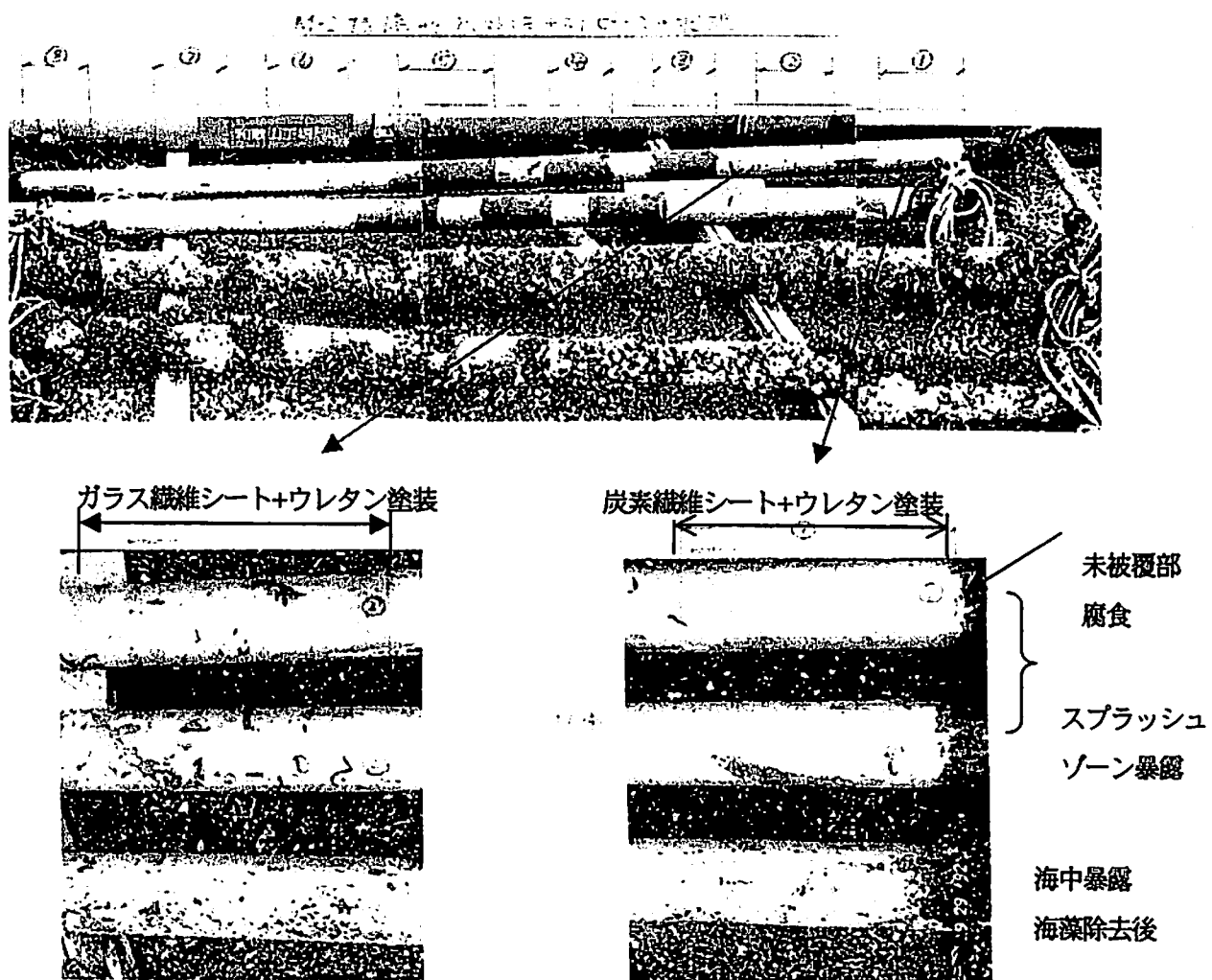


図-資 4.3.9 炭素繊維シート巻き立て鋼管の海中暴露試験（3年後）